

非破壊弾性測定によるトマトの硬さ評価

崔 博坤 池田 敬

Firmness Evaluation of Tomato using Nondestructive Elastic Measurements

Pak-Kon CHOI Takashi IKEDA

明治大学科学技術研究所紀要 第 50 冊 No.2
MEMOIRS OF THE INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MEIJI UNIVERSITY Vol.50 No.2 2014

明 治 大 学 科 学 技 術 研 究 所

非破壊弾性測定によるトマトの硬さ評価

崔 博坤 池田 敬*

Firmness Evaluation of Tomato using Nondestructive Elastic Measurements

Pak-Kon CHOI and Takashi IKEDA*

*Department of Physics, School of Science and Technology, Meiji University***Department of Agriculture, School of Agriculture, Meiji University**1-1-1, Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, 214-8571 Japan**Received October 30, 2014 : Accepted December 12, 2014*

Synopsis :

Nondestructive method for firmness evaluation is required for sorting tomato quality. The velocity of surface elastic waves propagating on a tomato was measured at frequencies ranging from 0.5 to 19 kHz. The velocity dispersion curve observed suggests that the type of elastic waves is Lamb waves. The velocity measured around the tomato circumference at 1 kHz revealed the spatial distribution of internal carpel wall and external wall. The velocity measured for 21 tomatoes showed a little dependence on firmness.

Measurements of impact force and compression tests were also made for tomatoes with different firmness. The rising gradient of the impact-force curve showed a good correlation with the gradient of stress-strain curve, representing elastic constant, obtained in the compression tests, and also with the sensory firmness. A new parameter representing a loss tangent was suggested from the falling curve of impact force.

Key words: tomato, surface elastic waves, firmness, impact force, loss tangent

1. はじめに

果菜類の質を決める要素は、形状、香り、味、手触り、歯ごたえなど多くあるが、その中でも硬さは食感と関係があるのみならず、成熟度とも深く関連している。特にトマトの場合、硬さが最も重要な要素と言われている。果菜類の質は最終的には人が食べて決まるものだが、消費者の手に入るまでの時間や生産量の多さ等を考えると、生産者の段階で非破壊的な方法を用いて質を判断することが求められている。レストランなどで消費されるトマトでは、生産ラインで硬さを判断する必要に迫られているが、有効な方法は存在しない。

果菜類の硬さを測る最も簡易な方法は、プランジャーと呼ばれる種々の形状の端子を一定の深さ分だけ試料に押し付け、その圧力を測るというものである[1]。果実硬度計という名前で市販もされている。この方法は時間も

かかり、試料を傷つけてしまうので生産ラインで用いることはできない。また、その硬度の意味するところが物理的に曖昧である。圧縮試験は、実用的なものではないが弾性率を測ることができるのでよく用いられている。しかし、トマトのような球状物質の圧縮試験から弾性率を求めるのは単純なことではない。Hertzの接触理論を使って弾性率を近似的に求めることはできるが、よく知られていないポアソン比を使う必要がある[2]。トマトの果皮のみを切り出して圧縮試験を行い、弾性率を求めている例もある[3]。

音を使った方法として、音響インパルス応答も果菜類の硬さを調べるのによく用いられる[4]。スイカを叩いてその反響音から果肉の空洞や成熟度を知る、というのはその一例である[5, 6]。Schotteら[7]は、トマトをプラス

チック棒で叩いたときの反響音をマイクで検出した[8]。その共振周波数 f とトマト質量 m から $S = f^2 m^{2/3}$ というパラメータを定義し、人が認識した硬さや貯蔵時間と S との相関関係を調べ、 S がよい指標になることを示した。ただ、この方法では質量を測らないといけないという点が難点である。

トマトを自由落下させ、そのときに受ける衝撃力の時間変化波形から硬さを評価することも行われた[9-11]。衝撃力波形のどの部分が最もよく硬さを表現するか、詳しく議論されている。この方法は簡便なため、オンラインでの硬さによる選別にも応用できると報告されている。

超音波を使ってトマトの質を調べるという試みも Mizrach [12]が行っている。超音波測定では MHz 域を使うのが一般的だが、果菜類では超音波減衰が非常に大きいため[13]、50kHz で行われた。トマトの保存期間とともに減衰値が小さくなることがわかったが、硬さとの関係はあまり明かでない。

トマトの硬さと弾性的性質に相関があることはこれまでの研究で知られているが、生産者段階における検査という観点からは課題が多い。本論文では、弾性表面波を使った方法がトマトの硬さ評価に適用できないかどうかを検討した。この方法は、ゲルなどソフト物質のずれ弾性率を測定することを目的に Choi ら[14]が開発したものである。果菜類では、スイカ果肉の硬さ測定に初めて適用し、その有効性を確認した[15]。圧縮試験を除く従来の方法では、果菜類のどんな弾性率を測定しているのか必ずしも明かでないが、本方法では、表面波速度とずれ弾性率の関係が明かであることが特徴である。

また、トマトの落下による衝撃力試験も行った。従来注目されていなかった粘弾性を考慮して衝撃力曲線を解析した。さらに圧縮試験も行い、そこから得られる弾性パラメータと衝撃力試験との結果を比較した。

2. 実験

2.1 弾性表面波測定

ゲルや生体組織などは、ずれ弾性率の値が 10^4 - 10^5 Pa であり、金属などの固体の値 10^9 - 10^{10} Pa に比べてずっと小

さいので、ソフト物質と呼ばれることがある。果菜類では、ずれ弾性率がソフト物質と固体との中間的な値をもっていると予想される。ソフト物質では、擬似表面張力波と弾性表面波 (Rayleigh 波) が伝搬することが理論的に示されている[16]。後者は、媒質の弾性のみが関係し、その速度 V_R は次式で与えられる。

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

ここで、 σ はポアソン比、 G はずれ弾性率、 ρ は密度である。この理論はアガロースゲルの実験で検証された[17]。弾性表面波は固体でも伝搬することから、果菜類でも(1)式は成り立つ。表面波速度を測定することにより、(1)式から密度、ポアソン比を用いてずれ弾性率を求めることができる。トマトのポアソン比は測定が困難で、実はよく知られていない。しかし、ポアソン比が最小から最大まで、すなわち 0 から 0.5 の間で変化しても、(1)式右辺の係数は 0.87-0.95 と 10%程度しか変化しないので、ポアソン比の値は表面波速度にあまり影響を与えない。

上述の Rayleigh 波は、波長に比べて十分な厚さをもつ媒質中を伝搬する弾性波である。厚さが薄い場合は Lamb 波 (板波ともいう) とよばれ、速度は(1)式とは異なり周波数に依存する。Lamb 波には、振幅が伝搬物質の中心線に対して対称なモードと非対称なモードがあるが、非対称モードの速度 $V_L = \omega/k$ は以下の式で与えられる[18]。

$$(k^2 + s^2)^2 \sinh qd \cosh sd - 4k^2 qs \cosh qd \sinh sd = 0 \quad (2)$$

ここで d は試料厚さ、 k は波数、 ω は角周波数である。 q 、 s は、縦波速度 $v_l = \omega/k_l$ 、横波速度 $v_s = \omega/k_s$ を使って、 $q = \sqrt{k^2 - k_l^2}$ 、 $s = \sqrt{k^2 - k_s^2}$ と表される。(2)式には複数の解があるが、最低次モードの速度を周波数の関数として表すと、ゼロから単調に増加して Rayleigh 波速度に漸近する。

表面波速度の測定原理は、一定距離を伝搬するバースト状表面波の伝搬時間を測る、という単純なものである。ピエゾバイモルフ (20×35mm, 1mm 厚) を発信子として試料に軽く接触させると、表面波が伝搬する。一定距離

Δx 離れた場所でもう一つのピエゾバイモルフ受信子(10×10mm, 1mm 厚)を接触させておくと、表面波が検出される。発振信号との時間遅れ Δt を測定することによって、伝搬速度は次式より求められる。

$$V = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3)$$

Fig.1(a)は測定のブロック図である。発振器 (NF Circuit Design, WF1944A) で周波数 0.5-20 kHz, 波数が 20 周期分のバースト信号を発生させ、パワーアンプ

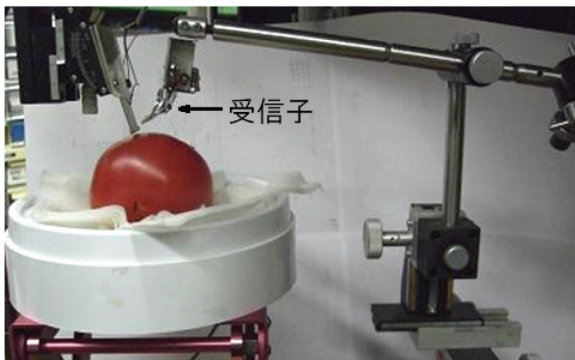
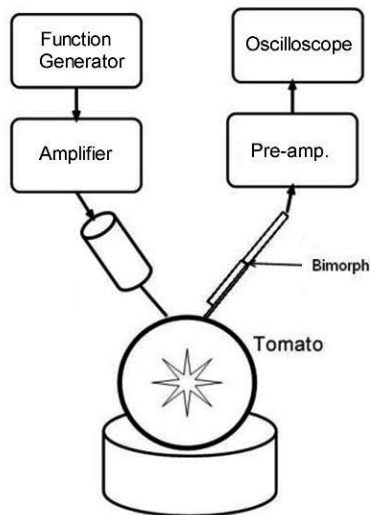


Fig. 1. (a) Experimental system for surface-wave measurement for tomato. (b) Photograph of the transducer and receiver touching tomato.

(Marantz, PM4400) で増幅し、発信子に入力する。受信信号はフィルター付アンプ (Stanford Research, SR560) で増幅し、オシロスコープ (HP, 54616B) で波形を観測する。Fig.1(b)は試料周辺の写真である。受信子は重さのバランスをとってトマト表面に軽く接触するよ

うになっている。

トマトの内部はいくつかの部屋(jelly room)に分かれており、その部分にゼリー状の物質に包まれた種が存在する。その部屋の数にはトマトの成長具合によって異なり、6から10部屋程度存在する。楕円形となったトマトは小さく細かい部屋がランダムに構成されていることが多い。外観が整ったトマトほど部屋の場所が予想しやすい。予想の仕方として、トマトのヘタの部分はやや凸凹しており、凹んでいる部分が部屋と部屋のしきり部分の位置に相当している場合が多いが、外見と部屋は必ずしも一致しない。以下、部屋の上部に相当する箇所をゼリー部、部屋隔壁(carpel wall)の上部箇所をスジ部と呼ぶことにする。

トマト試料の大部分は、カンジンファーム(栃木県大田原市)より提供された桃太郎という種類を用い、採取後1週間以内に測定した。一部市販のものも用いた。

実験は、次の3種類を行った。まず、(1)周波数依存性を調べるため、ゼリー部の表面波速度をそれぞれ500 Hzから19 kHzの範囲で、硬さの異なる試料について測定した。次に、(2)表面波速度のトマトの場所による分布を調べた。トマトのヘタ部を北極にみたて、赤道に沿った外周を3-5mm 間隔で測定し、外周に沿った表面波速度分布を1 kHz, 10 kHz で測定した。最後に、(3)触感で硬さの異なる試料を準備し、14 kHzでの表面波速度の硬さ依存性を調べた。

本来は、伝搬距離の異なる数カ所で伝搬時間を測り、その平均を求める方が精度がよいが、トマトでは場所によるバラツキが大きいため1点測定しかできなかった。そのため速度の測定再現性は5%であった。また、一つのトマトでの6-10箇所ある隔壁部間での速度のバラツキは5-15%であった。ゼリー部でも同様であった。

2.2 衝撃力試験

2.2.1 トマトの受ける衝撃力

トマトのような球状物質が落下して硬い金属平面に衝突するとき、その平面が受ける力を求める。質量 m の球が、ある高さから自由落下し剛体平面に衝突したモデルを考える。衝突時の球の運動方程式は、 x をトマトの重心

位置, F を球に加わる力, g を重力加速度として

$$m\ddot{x} = -F + mg \quad (4)$$

である。

二つの弾性球が接触して変形したときの理論として Hertz の接触理論[19]が知られている。今の場合、片方の球は変形せず、その半径が無限大であると考えればよい。それによると、変位量は加わる圧力の $2/3$ 乗に比例する。すなわち、変位 u に対して

$$F = -ku^{3/2} \quad (5)$$

で与えられる。 k は弾性定数に相当するが、球のヤング率, ポアソン比, 半径をそれぞれ E, σ, R として次式で与えられる。

$$k = \frac{3E}{4(1-\sigma^2)}\sqrt{R} \quad (6)$$

球の粘性を考慮に入れるため, k を $k^* = k(1+i\alpha)$ のように複素数とすると[20]

$$\begin{aligned} F &= -k^* u^{3/2} = -k(1+i\alpha)u^{3/2} \\ &= -ku^{3/2} - i\omega u \frac{\alpha}{\omega} ku^{1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

単振動のように、変位が \sin 関数で表わされると近似すると, $i\omega u$ は速度に相当するので上式は

$$F = -ku^{3/2} - c\dot{u}u^{1/2} \quad (8)$$

となる。ただし, $c = \alpha k / \omega$ とおいた。平面が受ける力は(8)式で与えられる。

2.2.2 衝撃力測定実験

衝撃力測定を行い、硬さとの相関を調べるため圧縮実験も同じ試料で行い、その結果を比較した。試料はカンジンファームで採取した麗容（サカタのタネ）という種類のトマト 19 個である。触感で軟 (Soft)、中間 (Medium)、硬 (Hard) の 3 種類に分け、質量の小さいものからそれぞれ順番に S 1～S 7、M 1～M 6、H 1～H 6 と名前を付けた。

衝撃力測定の実験装置を Fig. 2 に示す。試料を圧力センサの直上から落とす方法ではリバウンドのため衝撃力

波形が複雑になるので、試料を転がす方法を用いた。トマトを転がすことを想定した光学用レールを用意し、土台にのせ坂道を作る。レールの先の床上にセンサを配置する。フォースセンサ (Brüel&Kjær 8230 Force Transducer, 外径 19mm、感度 116mV/N) を外径 40mm、厚さ 5mm のアルミ円板の下側にネジ止めし、それをアルミ板 (200x200mm, 厚さ 10mm) に固定して動かないようにした。転がしたトマトの衝撃をさけるため、センサの後ろ側にタオルを置く。センサ出力はオシロスコープ (Agilent DSO7012B) で観測した。最終的には転がってきたものを測定することが理想だが、今回は様々な要因をさけるため、レールの末端からトマトを手で転がした。このとき、落とすトマトの最下点からセンサまでの高さは 23 mm だった。トマトがなるべくセンサの中心に接触するように調整した。保存した波形を Origin ソフトで解析した。今回、波形の立ち上がり部の直線と見なせる部分の傾きに着目した。一つのトマトにつき 3 ヶ所場所を変えてそれぞれ 3 回ずつ測定し、その傾きの平均値を求めた。

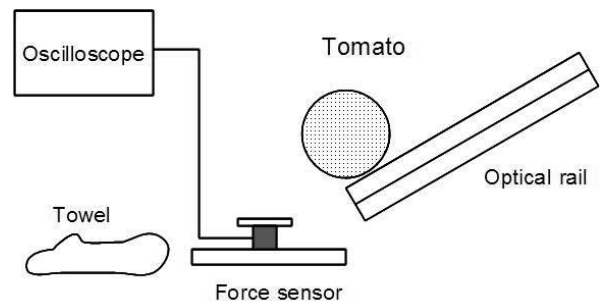


Fig.2 The experimental system for measuring an impact force from falling tomato.

Fig. 3 は圧縮試験の測定装置である。電子天秤上にトマトの赤道方向が鉛直になるようトマトを載せ、上方から 3 次元ステージに固定したアルミ平面板でトマトの赤道方向を圧縮する。平面板の移動速度は 0.5 mm/s である。ひずみ (=変位量/トマト直径) が約 0.035(変位量約 2mm) 程度になったら移動ステージを反転させ、同じ速度でもとにもどす。トマトにかかる力は、電子天秤の目盛をビデオカメラで撮影しておき、あとで解析した。

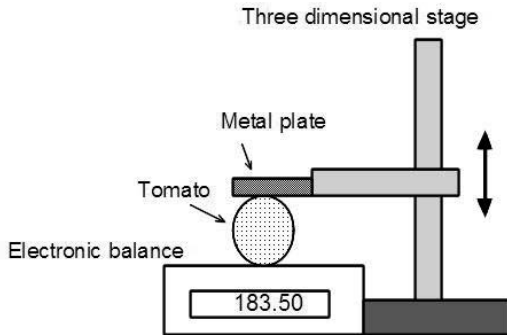


Fig.3 The experimental system for the compression test of tomato. Applied force was detected with an electronic balance and recorded with a video camera.

一つのトマトにつき 3 か所場所を変えて測定し、撮影した値からグラフを作り、立ち上がりの傾きを求め平均値を出した。

3. 表面波速度の測定結果と議論

3.1 表面波速度の周波数依存性

Fig. 4 は、ゼリー部上部の表面波速度を 500 Hz から 19 kHz の範囲で測定した、周波数依存性の結果である。試料は、触感による硬いもの(◆印)、柔らかいもの(○印)、市販のやや硬いもの(*印)である。市販のものは低周波域のデータを補うために用いた。3つの種類で代表的な1個のみの結果を示した。それぞれ数個の試料でも測定したが、周波数依存性は同じであった。速度は周波数増加と共に上昇し、高周波では漸近して一定値に近づいている。高周波ほど硬い試料の方が柔らかい試料よりも速度が大きく、低周波ではその差が小さくなっている。なお、触感による硬さが信頼できるものであることは、のちに示す圧縮試験の結果 (Fig.11) から示される。

速度に周波数依存性があることは、次のように説明される。弾性表面波、すなわち Rayleigh 波の速度式(1)には周波数が入っていないので、本来速度は周波数には依存しないはずである。Rayleigh 波は半無限媒質を仮定しており、表面下の深さ約1波長分に全エネルギーの90%が集中している。トマトのような構造では事情は複雑である。つまりトマト果皮の厚さ(7-8mm)が波長に比べて小さいので、半無限媒質とはならず、底面で波が反射してしまう。そのような場合は、2.1 で述べたように Lamb 波の

非対称モードと呼ばれる伝搬条件になり、周波数と共に速度が 0 から増加し、Rayleigh 波速度に近づくような分散曲線になることが知られている[18]。ちょうど Fig.4 で観測された分散関係と一致する。例えば周波数 10 kHz のとき、図から速度は約 200 m/s だから波長は 20 mm となる。これは果皮厚さよりも2倍以上大きく、Lamb 波の条件に相当する。今の測定域よりずっと高周波になり波長が果皮厚さに比べて小さくなれば、Rayleigh 波条件になるはずである。Fig.4 の高周波漸近値は Rayleigh 波速度の値 V_R と一致する。結果からずれ弾性率を評価すると、おおよそ 2×10^8 Pa となる。以上は果皮のみを考え、その下部にあるゼリーを無視した議論である。ゼリーを取り除いて果皮のみの速度を測った結果、12 kHz で約 10-20%速度が低下したが、基本的にはゼリーの影響は大きくないと考えられる。これらのことから、なるべく周波数を大きくして測定の方が果皮の硬さを反映している、ということが言える。低周波では、表面下深いところの情報を反映すると予想される。

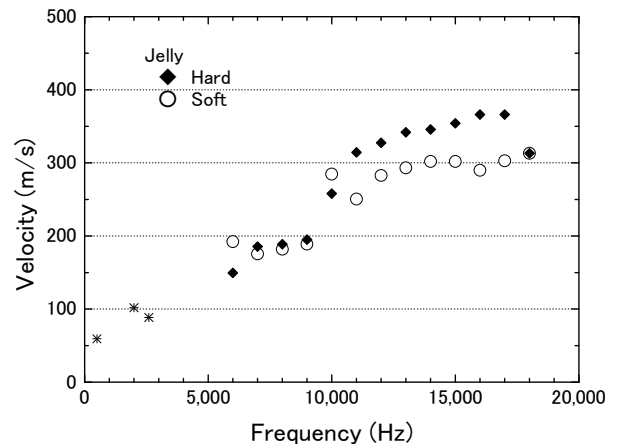


Fig. 4 Surface-wave velocity as a function of frequency on an external wall for hard tomato (diamonds) and soft tomato (open circles).

3.2 表面波速度の周方向分布

トマトの赤道に沿って1周を86分割して表面波速度を測定し、極座標表示したものを Fig.5 に示す。(a)は 1 kHz の結果、(b)は 10 kHz の結果である。周で平均すると速度は 1 kHz で約 60 m/s、10 kHz で 200 m/s である。用いたのは Fig.2 とは異なる試料だが、速度の値はほぼ一致してい

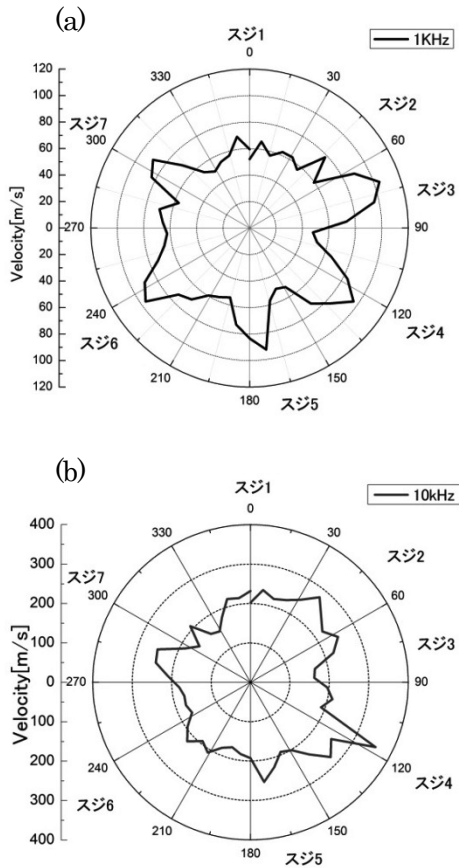


Fig.5 Distribution of surface wave velocity around a tomato circumference measured (a) at 1 kHz, and (b) at 10 kHz.

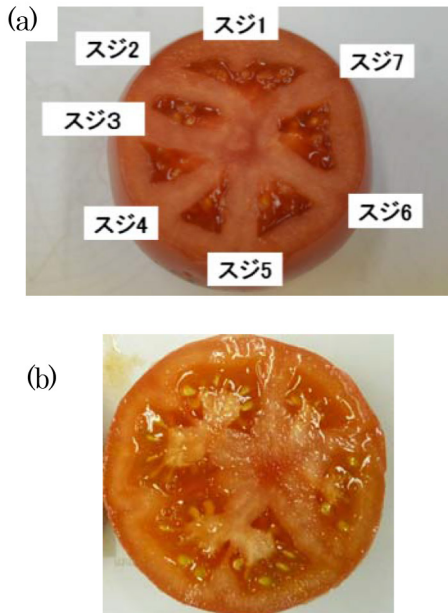


Fig.6 (a) Cross section of the tomato sample corresponding to the results in Fig.5. (b) Tomato sample with an internal structure having irregular position of carpel wall.

Fig.6(a) は、測定したトマトの断面を撮った写真である。Fig.5の結果と Fig.6(a)の写真では左右逆になっていることに注意して欲しい。隔壁部に対応してスジ1から6と名をつけている。低周波の1 kHz では、スジ部の位置と速度の大きい部位がほぼ対応しているように見える。高周波の10 kHz ではその傾向は小さくなり、平坦に近くなる。ただし、(b)の120度付近のスジ4部では10kHzでも速度は大きい。この場所は果皮も厚くなっている。Fig.6(a)はスジの構造が中心部まで規則的に並んでいて分かりやすいが、なかにはFig.6(b)のようにスジの構造がはっきりせず外見ではスジの位置が確定できない場合がある。

すでに述べたように、表面波はその1波長分くらいの深さにまでエネルギーが集中するので、速度は約1波長深さまでの構造を反映する。1 kHzの波長は約60 mm、10 kHzでは20 mmである。1 kHzでは波長が大きいため、表面から中心部までの組織の影響が出やすい。すなわち、スジ部では中心方向にまで硬い組織が伸びているため速度が大きくなり、ゼリー部では果皮の厚さが薄いためFig.4で示したようなLamb波の振舞いをして速度が小さいと考えられる。10 kHzでは、果皮の厚さが7-8mm程度であるのでゼリー部の影響も受けるが、その度合いは波長の長い1 kHzに比べて小さい。そのためFig.5(b)の10 kHzでは(a)に比べて速度の周方向依存性が少ない。すなわち低周波数の表面波を使えば、内部の組織構造がある程度予測できることになる。

3.3 表面波による硬さ評価

触感で区別したSoft, Medium, Hardの3種類の硬さのトマトを各6, 6, 9個、計21個を準備し(カンジンファーム提供のもの)、その表面波速度と硬さの相関を調べた。3種類に分類されたトマトの表面波速度を、周波数14 kHzの場合をFig.7に示す。各データは、一つのトマトのゼリー部を周囲にわたって各場所で測定し、平均したものである。個々のトマト速度のばらつきが大きい、全体を平均すれば硬いものほど約3%づつ速度が大きくなっている。なお、Fig.7の横軸はSoft, Medium, Hardの試料を単に並べただけで定量的な意味はない。直線は3つの平均値をつないだもので、傾向を示す。また、測定部位がゼリー部であることは実験後に切断して確認し

た。

特に軟らかい試料はばらつきが大きい。低周波の 1.5 kHz でも同様な測定を行ったが、硬さ依存性は観測できなかった。Fig.4 でも示したように、硬いトマトの方が表面波速度が大きい傾向がある。しかし、個々の試料の繊維組織などの影響に隠されてしまい、速度を測っただけで硬さの違いがわかる、というほどの明らかな相関はない。

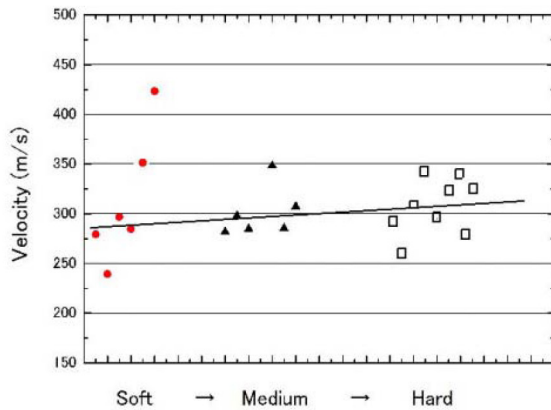


Fig.7 Firmness dependence of surface- wave velocity at 14 kHz. The solid circles, triangles and squares represent soft, medium and hard tomatoes, respectively.

4. 衝撃力試験の結果と議論

Soft, Medium, Hard 試料の衝撃力波形の例を, Fig. 8 (a),(b),(c)にそれぞれ示す。

各グラフの 3 本の曲線は、同じトマトの異なった個所での衝撃曲線を表わす。Fig.8 の波形は、どれもサイン波形の 1/2 周期分に近いが、立ち上がり部が直線的であるのに対し、立ち下がり部、特に電圧ゼロ付近で緩和的に変化している。衝撃力を表わす(8)式右辺の第 1 項は弾性項、第 2 項は粘性項を表わしている。変位や変位速度が小さいとき第 2 項は小さくなるので、立ち上がり部は主に弾性に関与する。したがって Fig.8 の曲線の立ち上がり中間部の傾きは弾性の指標、つまり弾性定数の実部 k を表わすと見てよい。従来の研究では、最大ピーク値と、電圧がゼロからピークに達するまでの時間との比（つまり、立ち上がり傾きの近似値）が指標になっていることが多

い。Lien ら[21]は最大ピーク値を電圧がゼロになるまでの時間で割り、さらにそれを質量で割った値の方がよい指標であると主張した。しかし、質量を使うのは实际的でない。それよりもここで行ったような、立ち上がり中間部の傾きを使った方がよい。

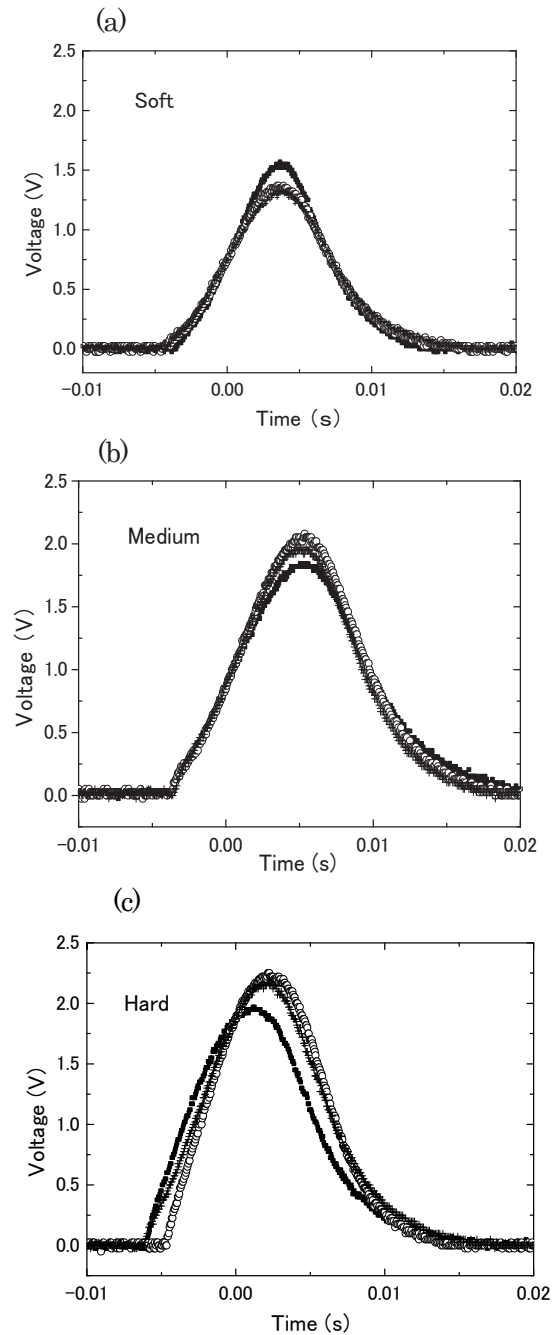


Fig.8 Impact force curves measured for three kinds of tomatoes with different firmness, soft (a), medium (b) and hard (c). Three curves in each figure were obtained with different positions of single tomato.

立ち下がり時の緩和変形はトマトの粘性の影響が出ているためと思われる。粘性の指標として、以下のような解析をした。得られた曲線の非対称性を抽出するため、最大ピーク以降のカーブ（試料がセンサに落下し、リバウンドする以降）を折り返し、Fig.9のような曲線を得る。ちょうど履歴曲線に相当するものが得られるので、その差分を積分し、積分値 S を最大ピーク値 P で割って規格化する。すなわち以下のようにパラメータ N を定義する。

$$N = \frac{\text{落下時とリバウンド時の衝撃力曲線の差の面積}}{\text{最大ピーク値}} \quad (9)$$

(8)式で N の意味を考える。第2項はリバウンド時には変位速度が反転するので落下時とは反対符号になる。一方第1項は落下時とリバウンド時では同じ符号なので、差をとれば消える。結局第2項に相当する項のみ残ることになる。すなわち、 N は定数 c 、つまり弾性定数の虚部の情報をもつパラメータと考えてよいことになる。これを弾性定数の実部 k で割ると、粘弾性理論で知られる損失正接 ($Q^{-1} = \tan \delta$) [22] に相当するものになる。

次に圧縮試験の結果を Fig.10 に示す。横軸は変位量をトマト直径で割ったひずみ、縦軸は電子天秤にかかる力 (N) である。Hard 試料を場所を変えて3回測定したときの結果である。衝撃力測定の結果と同じように、復帰時は緩和的な曲線になっている。

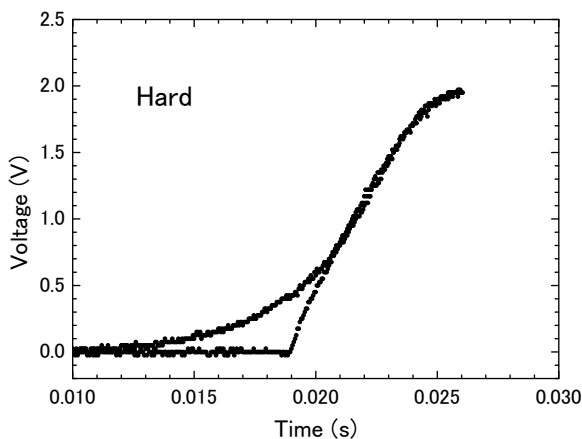


Fig.9 Impact force curve with folding back the latter half of the curve. The sample was a “hard” tomato.

全ての試料に対する衝撃力測定と圧縮試験の結果と質量を表1に示す。

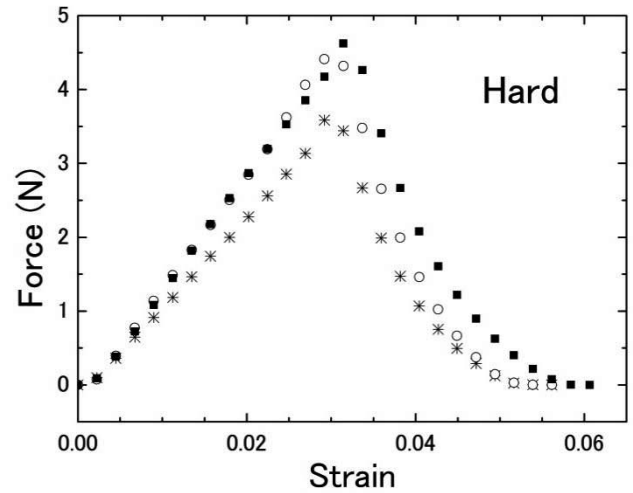


Fig.10 Stress—strain curves for a “hard” tomato. Compression tests were done three times for each tomato with different positions, and represented by the three kinds of symbols.

Table 1 Gradients of impact force and compression tests, and mass of tomatoes with different firmness.

Impact force			Compression tests			
Sample	Gradient	Standard deviation	Sample	Gradient (Force/Strain)	Standard deviation	Mass(g)
S1	175	35	S1	964	197	118.4
S2	77	22	S2	542	68	120.3
S3	147	31	S3	845	175	128.1
S4	156	26	S4	969	144	139.8
S5	96	23	S5	697	182	148.3
S6	88	27	S6	667	72	155.5
S7	100	29	S7	652	12	168
M1	263	144	M1	1034	43	156
M2	211	31	M2	931	76	187.1
M3	201	68	M3	1240	184	187.5
M4	160	28	M4	1112	281	198.1
M5	240	94	M5	1356	260	202.8
M6	197	34	M6	1175	6	203.5
H1	279	87	H1	1304	155	167.3
H2	326	96	H2	1292	57	187.7
H3	256	72	H3	1658	314	190
H4	354	58	H4	1458	168	199.4
H5	389	203	H5	1813	450	240.1
H6	372	48	H6	2288	321	262.3

衝撃力曲線の傾きと、圧縮曲線の傾きの関係のグラフを Fig.11 に示す。図に示されるように、よい直線関係が得られた。相関係数は 88% であった。図中で、赤丸●、三角▲、四角□の印は、あらかじめ触感によって柔らかい順に Soft, Medium, Hard の 3 種に分けたもののデータである。衝撃力曲線の傾きは触感ともよく一致していることがわかる。

Fig.12 は、式(7)で示した N を k で割った値、すなわち損失の指標となる値を、圧縮曲線の傾きの関数としてプロットしたものである。図のように、柔らかいものほど損失が大きいという結果を示している。実線は実験値にフィットした指数関数である。

これらの原因について考察してみる。衝撃力測定は静的測定ではなく、ダイナミックな測定である。Fig.8 で示されたインパクトの時間は 10ms、周波数にすると 100Hz のオーダーである。一方、圧縮試験は 1 Hz 以下の静的測定である。触感による硬さは静的な量と言えるであろう。弾性についてはダイナミックな測定と静的測定の結果がよい相関を示した。したがって、衝撃力の弾性パラメータ（傾き）は触感と相関がある、ということになる。粘性についてはどうか。トマトを手で押したときの感触では、粘性による何らかの差を感じるの難しい。軟らかいトマトでは粘性が大きいと予想されるので、エネルギー損失も大きいであろう。Fig.12 の結果はその予想と一致している。Fig.10 の圧縮試験の結果でも、衝撃力曲線と同じように後半の部分が緩やかな変化を示している。しかし、圧縮試験は変位量が大きく塑性変形にまで達しており、粘性の効果のみとは言えない。

トマトには弾性と粘性、すなわち粘弾性があることはこれまでも指摘されていた[1]。ジュースやペーストの状態では粘弾性の実験例[22]があるが、丸ごとのトマトではほとんど例はない。衝撃力曲線から粘性の情報が得られることを指摘したのは、本実験結果が初めてであろう。今後、成熟度や保存時間との関係が明らかにできれば、果菜類の質を判断する新たなパラメータになるものと期待される。

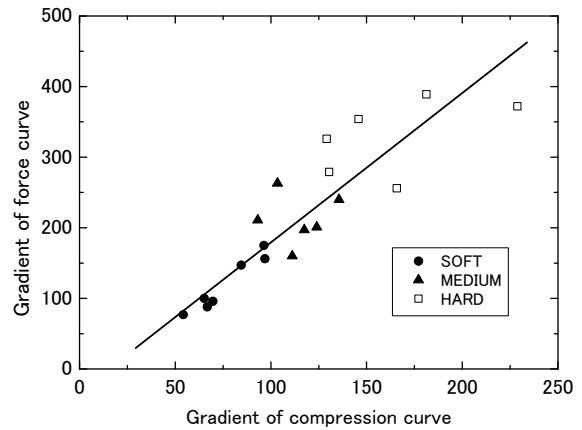


Fig.11 Correlation of gradient of impact force curve with that of compression curve. Soft (solid circles), Medium (triangles) and Hard (squares) samples were selected by tactile impression.

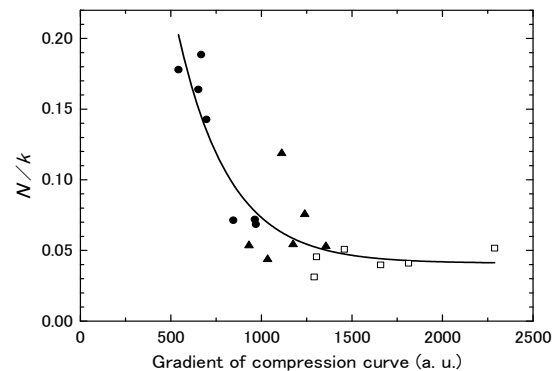


Fig.12 Relationship between the loss parameter N/k and the gradient of compression curve. Soft (solid circles), Medium (triangles) and Hard (squares) samples were selected by tactile impression.

5. 結論

トマトの表面波速度を 500-19k Hz で測定した結果、以下のことがわかった。ゼリー部で表面波速度は周波数とともに上昇し、一定値に漸近するという Lamb 波非対称モードの分散関係を示す。1kHz 表面波速度の周方向分布はトマト内部の構造を反映し、ゼリー部と隔壁部の差を検出することができた。10 kHz ではゼリー部と隔壁部の差は少なかった。この結果は、表面下の弾性情報が得られるという従来法にはない本方法の特徴を活かしたも

のである。例えばスイカのように、果皮と果肉の硬さに大きな差があるような試料に対して適用するのが興味深いであろう。

触感で硬さの異なるトマトで表面波速度 (14kHz) を測った結果では、トマトの個々の繊維構造が大きく影響するためか、触感による硬さとの明らかな相関は認められなかった。

トマトの転がし試験を行い、衝撃力曲線を測定した。その立ち上がり部傾きが、圧縮試験による硬さの結果、および触感による硬さとよい相関があることがわかった。また、衝撃力の立ち下がり部からトマトの損失正接の情報が見られることを示した。これは軟らかさの指標になる可能性がある。転がし試験は、オンラインでトマトの選別をする際に有利な方法である。今後はより多くのデータを積み重ねることで、有効な方法として確立する必要があるだろう。

謝辞

本研究の動機は、カンジンファームの新堀健二氏との議論から生まれました。またトマト試料も提供していただきました。深く感謝いたします。実験は、津久井陸王、船山幸多、小菅美和、李香福の諸君の協力を得ました。記して感謝します。本研究は、明治大学科学技術研究所重点研究 B、JST 重点地域研究開発推進プログラムの補助を受けました。

参考文献

[1] J. A. Abbott, Quality measurement of fruits and vegetables, *Postharvest Biol. Technol.* 15 (1999) 207–225
 [2] P. Sirisomboona, M. Tanaka, and T. Kojima, Evaluation of tomato textural mechanical properties, *J. Food Eng.* 111 (2012) 618–624.
 [3] Z. Li, P. Li, H. Yang, J. Liu, and Y. Xu, Mechanical properties of tomato exocarp, mesocarp and locular gel tissues, *J. Food Eng.* 111(2012) 82-91.
 [4] J. A. Abbott, R. F. Backman, J. V. Fitzgerald, and F. J. Matusik, Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables, *Food technol.* 22 (1968) 101-112.
 [5] M.L. Stone, P.R. Armstrong, X. Zhang, G. H. Brusewicz, and

D.D.Chen,. Watermelon maturity determination in the field using acoustic impulse impedance techniques. *Trans. ASAE* 39 (1994) 2325-2330.
 [6] J. Sugiyama, T. Katsurai, J. Hong, H. Koyama, and K. Mikuriya, Melon ripeness monitoring by a portable firmness tester. *Trans. ASAE.* 41 (1998) 121-127.
 [7] S. Schotte, N. De Belie, and J. De Baerdemaeker, Acoustic impulse-response technique for evaluation and modelling of firmness of tomato fruit, *Postharvest Biol. and Technol.* 17 (1999) 105–115
 [8] B. De Ketelaere, and J. De Baerdemaeker, Tomato firmness estimation using vibration measurements, *Mathematics and Computers in Simulation* 56 (2001) 385–394
 [9] D. Nehir, Z. Schmilovitch, and B. Ronen, Tomato grading by impact force response, *ASAE Paper*, No.86-3028.
 [10] M. J. Delwiche, “Theory of fruit firmness sorting by impact forces” *Transactions of the ASAE*, 30 (1987) 1160-1171.
 [11] M. Delwiche, and Y. Sarig, A probe impact sensor for fruit firmness measurement, *Trans. ASAE* 34 (1991) 187-192.
 [12] A. Mizrach, Nondestructive ultrasonic monitoring of tomato quality during shelf-life storage, *Postharvest Biol. Technol.* 46 (2007) 271-274.
 [13] P. Chen and Z. Sun, A review of non-destructive methods for quality evaluation and sorting of agricultural products *J. Agric. Eng. Res.* 49 (1991) 85–98.
 [14] H. Takahashi, P.-K. Choi, Sol-gel transition in gelatin observed with surface waves, *Japan. J. Appl. Phys.* 35 (1996) 2939-2943.
 [15] T. Ikeda and P.-K. Choi, 投稿中
 [16] Y. Onodera and P.-K. Choi, Surface-wave modes on soft gels, *J. Acoust. Soc. Am.* 104 (1998) 3358-3363.
 [17] P.-K. Choi, E. Jyounouti, K. Yuuki, and Y. Onodera, Experimental observation of pseudocapillary and Rayleigh modes on soft gels, *J. Acoust. Soc. Am.* 106 (1999) 1591-1593.
 [18] K. L. Johnson, *Contact Mechanics*, (Cambridge University Press, 1989) Chap.4.
 [19] 本江, 佐藤, 岩田, 小松崎, 本郷, 球と平面からなる衝突系のモデル化と解析, *日本機械学会論文集 (C 編)* 65-634 (1996) 127-133.
 [20] I. A. Viktorov, *Rayleigh and Lamb Waves*, (Plenum Press, N. Y., 1967) p.67
 [21] C.-C. Lien, C. Ay, C.-H. Ting, Non-destructive impact test

for assessment of tomato maturity, J. Food Eng., 91 (2009) 402-407.

[22] 中川鶴太郎, レオロジー, (岩波書店, 東京, 1983)

第5章

[23] P. E. D. Augusto, V. Falguera, M. Cristianini, and A. Ibarz, Viscoelastic properties of tomato juice, Procedia Food Sci. 1 (2011) 589-593.

©2014, Institute of Science and Technology, Meiji University

明治大学科学技術研究所紀要 第50冊

2015 年 2 月 20 日 発行

発 行 所 明 治 大 学 科 学 技 術 研 究 所
神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
(〒214-8571) TEL(044)934-7718
FAX(044)934-7917
URL http://www.meiji.ac.jp/gi_ken
E-mail: gi_ken@mics.meiji.ac.jp
発 行 者 明治大学科学技術研究所長
下 坂 陽 男

印 刷 所 株式会社 外為印刷
東京都台東区浅草 2-29-6 天野ビル 2 F

明治大学科学技術研究所紀要第 50 冊（2014 年度）目次

No. 1	Goeritz Invariants of Torus Links Kazushi AHARA, Shingo WATANABE	1-13
No. 2	非破壊弾性測定によるトマトの硬さ評価 崔博坤, 池田敬	14-24